

基于动态规划的 PHEV 全程能量管理策略研究^①

徐萍萍^{②*} 邹伟^{**} 宋建国^{*} 沈光地^{*}

(* 北京工业大学电子信息与控制工程学院 北京 100022)

(** 中国科学院自动化研究所高新技术创新中心 北京 100080)

摘 要 在电动汽车仿真平台上,根据实际车型及技术现状合理地设置动力参数,搭建了外接充电式混合动力电动汽车(PHEV)整车模型,在此基础上,结合 PHEV 的特点,分析了 PHEV 的控制系统结构,提出了一种以提高燃油经济性为目标的全新的基于动态规划(DP)的 PHEV 全程能量控制策略。该策略突破了目前 PHEV 采用的电量消耗-电量保持模式的能量优化管理思路。为了最大限度地使用电池能量,以电池荷电状态(SOC)在路程起点处达到上限值,在终点达到安全下限值为限制条件,运用动态规划算法使得全程燃料经济性最高。仿真结果表明,与传统的能量管理策略相比,基于 DP 的全程能量管理可大大提高燃料经济性。

关键词 外接充电式混合动力电动汽车(PHEV), 动态规划(DP), 全程能量管理优化

0 引言

随着全球能源和环境问题的日益突出,开发低油耗、低排放的新型汽车成为当今汽车工业发展的首要任务。在这种背景下,融合传统燃油汽车和纯电动汽车(electric vehicle, EV)优点的充电式油电混合动力汽车(plug-in hybrid electric vehicle, PHEV)成为当今最具应用前景的低排放、低能耗汽车^[1,2]。PHEV 主要以电力驱动,同时搭配汽油或柴油内燃机引擎,其电池容量较大,可以靠电力行驶较远的距离,燃油使用量与温室气体排放量都较低。PHEV 除了以引擎进行充电外,也可以用家用外接电源充电。在车辆滑行状态或在城内行驶、时速低于 40km/h 时,完全以电力驱动;在加速或爬坡的行驶状态下,行车计算机根据当时的功率需求进行能量的切换,减速制动时能回收能量。目前 PHEV 的续航力约在 30~90km,乘载的马达约为 50~80 千瓦,使用的电池容量则视车辆续航力而定,约为 6~20 千瓦小时不等。外接充电式混合动力汽车是最新一代混合动力汽车类型,近年来受到各国政府、汽车企业和研究机构的普遍关注^[3]。

作为一种新型的多能源交通工具,混合动力汽

车的性能与其采用的能量管理策略密切相关。近 10 年来,人们从控制和优化的角度研究混合动力电动汽车的能量管理优化^[4,6]。对于 PHEV 的能量管理优化尚处于起步阶段。根据汽车需求功率和动力电池荷电状态(state of charge, SOC)确定燃料电池的工作状态,电池组工作模式主要包括电量消耗(charge-depleting, CD)模式和电量保持(charge-sustaining, CS)模式,相应的控制策略主要分为电量消耗策略和电量保持策略。电池组自充满电($SOC = SOC_{max}$)至达到安全下限值内, SOC 可能有些波动,其平均水平在不断减少,电量在不断消耗,此过程称为电量消耗模式。当电池组的能量消耗到一定程度,即电池 SOC 达到最小门槛值($SOC = SOC_{min}$)时,为了保证车辆性能和电池组的安全性,车辆进入电量保持模式,动力主要来自于发动机,电池组 SOC 保持相对恒定,处于 SOC_{min} 附近,但 SOC 可以有波动现象。基于上述分析,本文提出了一种全新的适合于 PHEV 的基于动态规划的全程能量优化管理策略。PHEV 不同于传统混合动力电动汽车,其车载电池能量更大,使用时间更长,燃料经济性依赖于不同路段的优化平衡,所以全程的能量优化管理更为重要。研究表明, PHEV 全程能量优化管理对提高燃料经济性有重要作用^[7]。

① 北京市教委,北京市基金委重点项目(KZ20041000501)共同资助。

② 女,1973 年生,博士生,讲师;研究方向:控制理论与应用,电动汽车电驱动系统与能量管理;联系人, E-mail: xupingping@bjut.edu.cn (收稿日期:2009-08-05)

1 PHEV 控制系统结构

混合动力系统同时呈现出多种动态特性,如连续时间动态特性、离散事件动态特性、切换及跳变特性等,因此,该系统是典型的混杂系统。多数情况

下,混杂系统控制器的设计都基于集成分布控制的思想。混合动力电动汽车控制为典型的混杂控制,并联混合动力电动汽车的分层阶梯控制系统的控制结构如图 1 所示^[8-10]。从动力总成部分可以看出,动力连接方式为典型的并联结构,本文研究的对象为并联式 PHEV。

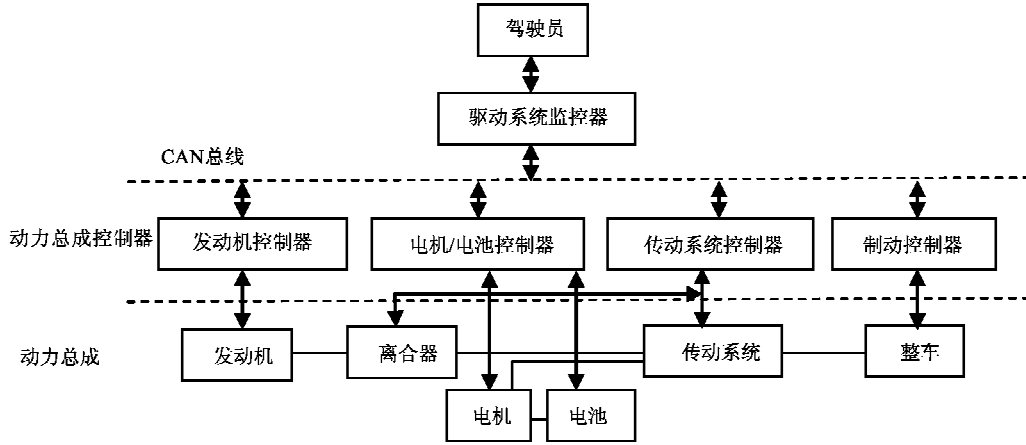


图 1 并联混合动力电动汽车动力总成及分层控制结构图

图 2 为简化的混和驱动控制系统框图,用来研究 PHEV 能量管理策略。驾驶员的加速踏板和制动踏板操作对应的扭矩指令为 T_{acc} 和 T_{brk} , T_w 为满足车辆行驶需要的扭矩。在实际实时控制中,驾驶员根据当前车速和期望车速的差值来调制加速踏板或制动踏板的输出,使得 $T_w = T_{acc} + T_{brk}$ 。动力总成控制器分析输入信号,做出能量分配策略,进而控制动力总成部分。

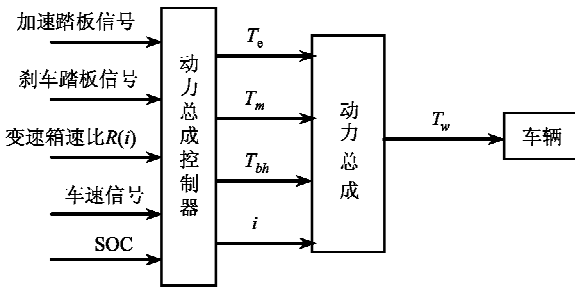


图 2 简化的混合驱动控制系统框图

图 2 所示混合动力系统中,发动机和电机的扭矩和转速关系如下:

$$T_w = \eta_T \cdot R(i) \cdot (T_e + \rho \cdot \eta_e \cdot T_m) + T_{bh} \quad (1)$$

$$\omega_w = \frac{\omega_e}{R(i)} = \frac{\omega_m}{\rho \cdot R(i)} \quad (2)$$

式中:

T_w 为车轮输出扭矩, Nm;

T_e 为发动机轴输出扭矩, Nm;

T_m 为电机轴输出扭矩, Nm;

T_{bh} 为摩擦制动器在车轮上产生的制动力矩(负值), Nm;

$R(i)$ 为变速器第 i 档速比与主减速比的乘积;

ρ 为电机轴与发动机轴的速比;

η_T 为变速器与驱动桥的总传动效率;

η_e 为电机轴到变速器输入轴的传动效率;

ω_w 、 ω_e 、 ω_m 分别为车轮、发动机和电机的转速, rpm。

2 动态规划算法^[11]

加速情况下, $T_{bh} = 0$, 且

$$T_w = \eta_T \cdot R(i) \cdot (T_e + \rho \cdot \eta_e \cdot T_m) \quad (3)$$

在制动或减速情况下, $T_e = 0$, 且

$$T_w = \eta_T \cdot R(i) \cdot \rho \cdot \eta_e \cdot T_m + T_{bh} \quad (4)$$

如果给定驾驶循环(以车速形式给出), 车辆每一时刻的车速就是已知量, 车轮轴上的驱动扭矩需求 T_w 可以通过逆向求解车辆动力学方程而得。将扭矩需求 T_w 作为车轮动力学模型输入, 通过解车轮

模型可以得到对应的车轮转速 ω_w 。假定所有的机械传动效率为定值,那么式(1)中独立的自变量只有两个,取 T_m 和 $R(i)$ 。

根据以上分析,定义系统的控制变量为

$$u(t) = [T_m(t), i(t)] \quad (5)$$

状态变量为

$$x(t) = [SOC(t), R(i(t))] \quad (6)$$

给定行驶循环下,混合动力车辆的最优控制问题的提法如下:

寻找一容许控制 $u(t)$, 使系统由初态 $x(0) = [SOC(0), R(1)]$ 出发,在终端时刻 t_f 转移到状态 $x(t_f) = [SOC(t_f), R(i(t_f))]$, 并使系统的性能指标函数 J 最小, J 为给定驾驶循环下的累计燃油消耗量:

$$J = \int_0^{t_f} L(x(t), u(t), t) dt \quad (7)$$

式中 $L(x(t), u(t), t)$ 为 t 时刻的燃油消耗率(性能指标只考虑燃油经济性,不考虑排放性能)。

并且增加一个重要的限制条件。初始值 $SOC(0)$ 为 $SOC_{\max}$, 为电池的最高荷电量,而终端时刻的 $SOC(t_f)$ 为 $SOC_{\min}$, 保证在整个路程最大限度的使用电池能量,从而提高燃料经济性。本文中 SOC 的高、低门限值分别是 0.7 和 0.3。

3 问题求解

通过离散方法来解决有限时间域的动态优化问题。离散形式的性能指标函数为

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} L(x(k), u(k), k) \quad (8)$$

L 为单个阶段的代价。 $x(k+1) = g(x(k), u(k))$, $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$, g 为状态转移函数,将两个状态变量分开来写:

$$\begin{aligned} SOC(k+1) &= SOC(k) + \Delta SOC(k) \\ &= SOC(k) + g_1(T_m(k), \omega_m(k)) \end{aligned} \quad (9)$$

$$R(i(k+1)) = g_2(i(k)) \quad (10)$$

状态变量和控制变量服从以下约束:

$$\omega_{e_min} \leq \omega_e(k) \leq \omega_{e_max} \quad (11)$$

$$T_{e_min}(\omega_e(k)) \leq T_e(k) \leq T_{e_max}(\omega_e(k)) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} T_{m_min}[\omega_m(k), SOC(k)] &\leq T_m(k) \\ &\leq T_{m_max}[\omega_m(k), SOC(k)] \end{aligned} \quad (13)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC(k) \leq SOC_{\max} \quad (14)$$

根据 Bellman 最优性原理,求解最小性能指标的

动态规划递归方程

$$\begin{aligned} J^*(x(k), k) &= \min_{u(k)} \{L(x(k), u(k), k) \\ &\quad + J^*(g(x(k), u(k)), k+1)\} \\ k &= N-1, N-2, \dots, 0 \end{aligned} \quad (15)$$

并且有 $J^*(x(N), N) = 0$ 。

$J^*(x(k), k)$ 为过程结束的最优性能指标。动态规划方法解题需要两个过程:第一个过程为逆向递推过程,利用递归方程从最后一个阶段开始,求得各阶段每个状态 $x(j, k)$ 的最优性能指标 $J^*(x(j, k), k)$ 和最优控制 $u(x(j, k), k)$;第二个过程为正向递推过程,进行最优控制序列和最优轨迹的复原,从给定的初始状态,找到对应的最优控制。

动态规划求解采用标准数值方法——量化和插值。采用高次多项式插值并不总能得到精确的解,实际上应用了线性插值方法,插值法不可避免地引入了误差,为了保证精度,必须提高量化程度^[9]。另外,状态转移和代价函数的计算通过求解系统的动态模型实现,如果直接采用系统的 Simulink 模型计算,计算时间是难以接受的。本文为了加快计算速度,利用 MATLAB/RTW(Real-Time Workshop)的自动代码生成功能将 Simulink 模型转换成 C 代码,然后再将其编译成 MATLAB 的可执行代码,在动态规划算法程序中调用。

4 实例仿真

为了验证上述方法,按照整车动力系统和驾驶工况要求,依据传统运动型多用途车(sport utility vehicle, SUV)的整车模型及动力性能要求,用电动汽车仿真软件 ADVISOR 构建了充电式混合动力 SUV^[12]。传统 SUV 发动机功率为 102kW,混合设计将发动机减少为 75kW,从 ADVISOR 软件中选取的电机功率为 50kW。整个功率性能满足 DOT(U.S. Department of Transportation)标准驾驶工况。参数配置如表 1 所示。

表 1 混合 SUV 部件参数表

总车质量(kg)	2000	最终驱动速比 Rfd	1
迎风面积(m ²)	2.66	发动机功率(kW)	75
空气阻力系数 CD	0.44	电机功率(kW)	50
车轮半径(m)	0.343	电池容量(Ah)	15
耦合速比 Rc	1	电池电压(V)	240
传动比	5 档:I:13.45; II:7.57; III:5; IV:3.77; V:2.84		

测试工况选用城市测功机驾驶循环(Urban Dynamometer Driving Schedule, UDDS),是美国国家环保局测试城市工况下车辆燃油经济性和排放性的标准循环,具有低速反复起停的城市道路特点,可用来模拟城市上班道路工况。

图3分别给出了车速、SOC、油耗及总传动比随时间变化的动态曲线。可以看出,行使过程中随车

速变化传动系统在5个档位之间不断切换,电池SOC在出发点时为初始值最高门限0.7,终点时为最低门限0.3,满足控制规律。当车速较高时,需要电机提供较大的转矩,所以SOC降低;当减速制动时,发动机产生的再生制动能量通过电机给电池充电,所以SOC上升。由于制动产生的能量有限,SOC在整个路程呈波动下降趋势。

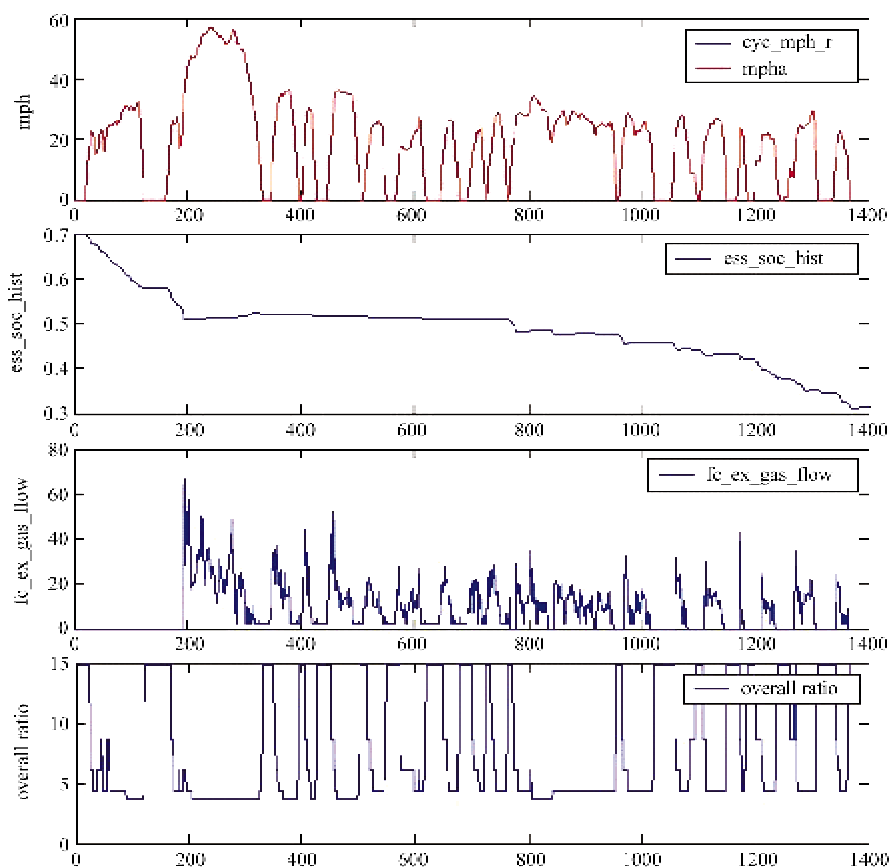


图3 车速、电池SOC、油耗及传动比动态曲线

图3还给出本控制规律下油耗随时间变化的曲线。当PHEV启动时,能量主要来自于电池,发动机关闭,输出扭矩为零,降低了发动机的低效温室气体的排放。

在同样测试工况下,传统SUV的平均等效燃油消耗为11.56/100km,简单电量消耗——保持模式控制策略下平均等效燃油消耗为9.77/100km。因为完成整个路程尽可能多地使用电力资源,基于全程动态规划(DP)策略平均等效燃油消耗仅为4.66/100km,有效地提高了燃油经济性。

改变测试工况,比较城市驾驶工况和高速路工况两种情况,还可以看到,PHEV城市工况的燃油经济性比高速路工况好,城市工况能够充分发挥

PHEV的特点。仿真结果还发现,当PHEV的行使路程大于15km时,燃料经济性更好。

5 结论

本文在电动汽车仿真平台上,结合实际车型和技术现状合理设置动力参数,搭建了PHEV整车模型。在此基础上,结合PHEV的特点,分析了PHEV的控制系统结构,以提高燃油经济性为目标,提出了外接式混合动力电动汽车基于路程的能量管理策略,突破了目前外接充电式混合动力电动汽车电量消耗-保持模式的能量优化管理思路。仿真结果证明基于DP算法的混合动力电动汽车全程能量优化

管理策略能大大提高燃料经济性,在此基础上将会进一步验证实车控制效果。

随着基于地理信息系统及车载 GPS 的智能交通系统的迅速发展,能够获得实时和历史交通流数据,从而建立起更准确的交通模型。基于先进交通模型的 PHEV 全程能量控制策略将会进一步提高燃油经济性。

参考文献

- [1] Chan C C. The state of the art of electric and hybrid vehicles, *Proc of the IEEE*, 2002, 90(2):247-275
- [2] Ahman M. Assessing the future competitiveness of alternative powertrains. *International Journal of Vehicle Design*, 2003, 33(4): 309-331
- [3] 陈全世,朱家琰,田光宇.先进电动汽车技术.北京:化学工业出版社,2007
- [4] 盖江涛,张承宁,李炯.混合动力汽车电机驱动系统效率评价研究.微电机,2007,40(4):73-75
- [5] 吴剑,张承慧,崔纳新.并联式混合动力汽车的 BP 网络实时能量管理.电机与控制学报,2008,12(5):610-614
- [6] Heemels W P M H, van den Bosch P P J, Steinbuch M. Energy management strategies for vehicular electric power systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2005, 54(3): 771-782
- [7] Carlson R W, Duoba M J, Bohn T P. Testing and analysis of three plug-in hybrid electric vehicles. In: Proceedings of the SAE Hybrid Vehicle Technologies 2007 Symposium, San Diego, USA, 283-290
- [8] 浦金欢,殷承良,张建武.并联型混合动力汽车燃油经济性最优控制.上海交通大学学报,2006,40(6):947-951,957
- [9] Lin C C, Peng H, Grizzle J W, et al. Power management strategy for a parallel hybrid electric truck, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2003, 11(6): 839-849
- [10] Emadi A, Rajashekara K, Williamson S S, et al. Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2005, 54(3): 763-770
- [11] Perez L V, Bossio G R, Moitre D, et al. Optimization of power management in an hybrid electric vehicle using dynamic programming. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2006, 73(1-4):244-254
- [12] 陈树勇,陈全世.动力驱动系统匹配与控制策略研究.计算机仿真,2009,26(3):276-280

Research on trip based optimal power management for plug-in hybrid electric vehicles

Xu Pingping^{*}, Zou Wei^{**}, Song Jianguo^{*}, Shen Guangdi^{*}

(* College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022)

(** Hi-tech Innovation Centre, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

The paper proposes a novel dynamic programming-based whole-trip power management strategy for plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) after the construction of a PHEV model on the electric vehicle simulation platform based on selecting rational dynamics parameters, with the purpose of economizing fuel. Different from the present charge-depleting-charge sustaining power management strategy for PHEVs, the new trip based optimal power management strategy gives the limitation that the state of charge (SOC) reaches the maxim level at the starting point trip and reaches the healthy lowest level at the destination of the trip, and uses the dynamic programming algorithm to economize fuel. The simulation results demonstrates the new strategy can greatly economize fuel compared with the present method.

Key words: plug-in hybrid electric vehicle (PHEV), dynamic programming (DP), trip based optimal power management